

蚀变岩石和矿物光谱的切比雪夫 比值函数波形分析*

陈 宁

徐根兴

崔承禹

(地矿部地质遥感中心)

(航空航天部二院二〇七所)

(中科院遥感应用研究所)

1990年8月12日收稿

摘 要

本文用切比雪夫比值函数对矿物学和岩石学剖面样品在 2.0—2.5 μm 谱域的光谱进行波形分析。结果表明,波形分析技术在鉴别矿物、确定岩石绢云母化和碳酸岩化蚀变分带,及蚀变矿物相对含量等矿物学和岩石学的光谱研究中具有应用价值。

关键词 光谱 切比雪夫比值函数 波形分析 蚀变岩石和矿物

波形分析技术是近年来发展起来的光谱分析新方法。本文对这种方法进行了初步讨论,并据此对由 IRIS 红外智能光谱仪测得的一条热液蚀变矿物剖面 and 一条热液蚀变岩石剖面的样品在 (2.0—2.5 μm) 谱域的光谱进行了波形分析研究。

一、地物光谱波形分析的物理意义

数学上可用切比雪夫正交多项式生成连续函数来拟合非连续实测光谱,其数学表达式为:

$$f(x) = \sum_{i=1}^N T_i(x) a(i) + s(x) \quad (1)$$

式中 $f(x)$ 为被拟合光谱在 x 点的取值; $s(x)$ 为拟合误差; $T_i(x)$ 为第 i 级切比雪夫多项式,其系数:

$$a(i) = \frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 (1-x^2)^{\frac{1}{2}} \cdot f(x) \cdot T_i(x) dx \quad |x| < 1 \quad (2)$$

(2)式表明 $a(i)$ 是对 $f(x)$ 整条光谱的加权积分,权函数是复合函数由两部分组成,即:

$$\rho = \rho_1 \cdot \rho_2 = (1-x^2)^{\frac{1}{2}} \cdot T_i(x) \quad (3)$$

(3)式中 ρ_1 只与 x 有关,与系数级次无关,所以在求各级 $a(i)$ 时,对不同级次 i ρ_1 为“常”权函数; ρ_2 即为切比雪夫多项式,是取值随 x 变化且相对 x 轴上下摆动的周期函数,其周期与级次 i 有关,所以是变频权函数。因为岩石和矿物的光谱是其对阳光的多频电磁波

* 冶金部山西省冶金地质研究所唐耀林副所长为作者提供了部分岩石样品,中国地质大学孙岱生教授、藏维生老师指导下进行显微镜薄片鉴定,在此一并表示感谢。

谱反射的迭加, ρ_2 对不同频率的光谱特征给予了不同权重, 所以不同级次的 $a(i)$ 分别突出和增强了不同频率的光谱特征信息。

现将第 k 条光谱的第 i 级切比雪夫多项式系数和第 j 级切比雪夫多项式系数的比值定义为第 k 条光谱的第 (i, j) 个切比雪夫比值函数(以下简称函数), 其数学表达式为:

$$F(i, j, k) = [a(i)/a(j)]_k \quad (4)$$

用(4)式所定义的函数对光谱曲线进行信息提取即为光谱的切比雪夫比值函数波形分析。由于切比雪夫多项式在对曲线拟合时收敛极快, 所以取前 11 项已能满足精度要求, 则(4)式中的 (i, j) 取值范围是(0—10)。

二、矿物光谱波形分析

(一) 剖面建立

光谱波形分析的优势在于能提取和比较光谱间不易察觉的微小差异。为了研究其在矿物学研究上的应用, 建立由伊利石、叶腊石、三水铝石和一水铝石 4 种矿物组成的矿物学剖面, 其光谱如图 1 所示。

这种矿物分布特征可能在有岩体侵入的铝土矿地区出现, 有其理论依据。在以富含伊利石的页岩为其上下盘, 并以三水铝石为主要矿物成分的层状铝土矿地区, 当有岩体侵入时, 铝土矿矿体中的三水铝石在热动力作用下会与氧化硅合成为叶腊石, 在接近岩体的部分, 三水铝石会失水形成一水铝石, 从而形成依上述顺序排列的矿物学剖面。由此可见建立这一剖面

在理论上是成立的。而且在事实上也是存在的, 如在日本的 Goto 铝土矿—刚玉矿床内就具有此类矿物分布特征(据砂川一郎, 1957)。

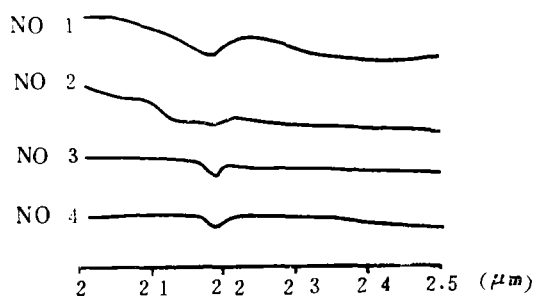


图 1 蚀变矿物光谱

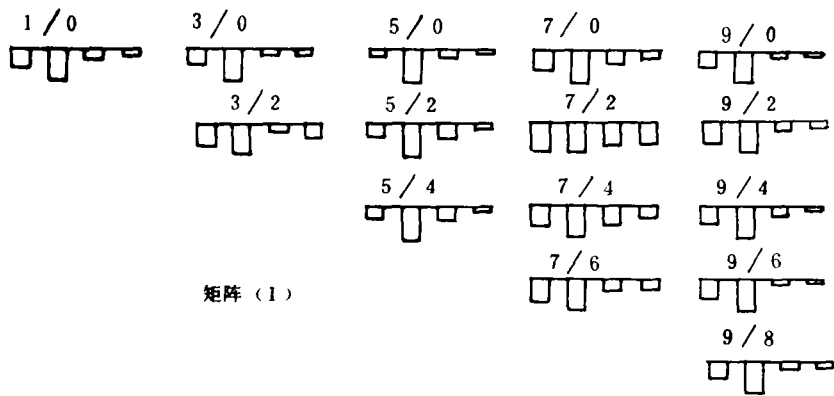
Fig. 1 Spectrum of alteration minerals

No.1 伊利石 No.2 叶腊石 No.3 三水铝石 No.4 一水铝石

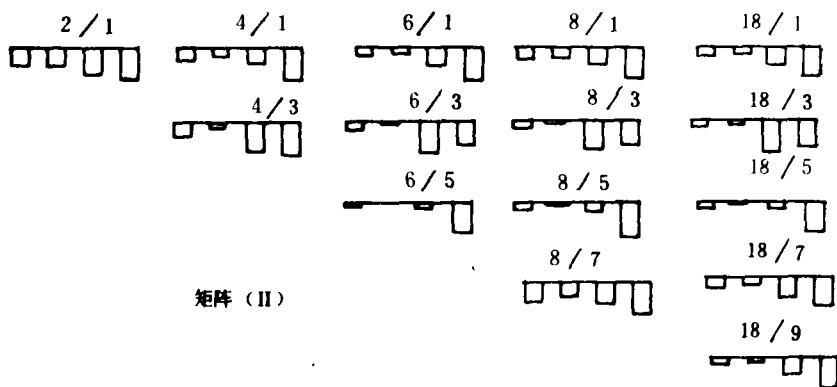
(二) 矿物光谱波形分析

对图 1 所示矿物光谱进行拟合求出函数值, 并在 (i, j) 两个自变量不变的情况下, 对自变量 $k(k = 1, 2, 3, 4)$ 进行归一化。在不重复、无遗漏, 且 $i > j$ 和 $i \neq j$ 的准则下, 每条光谱可归纳为 4 组, 共有 55 个函数; 4 组函数分别构成 4 个归一化函数直方图矩阵, 如图 2 所示。4 个矩阵的通式分别为:

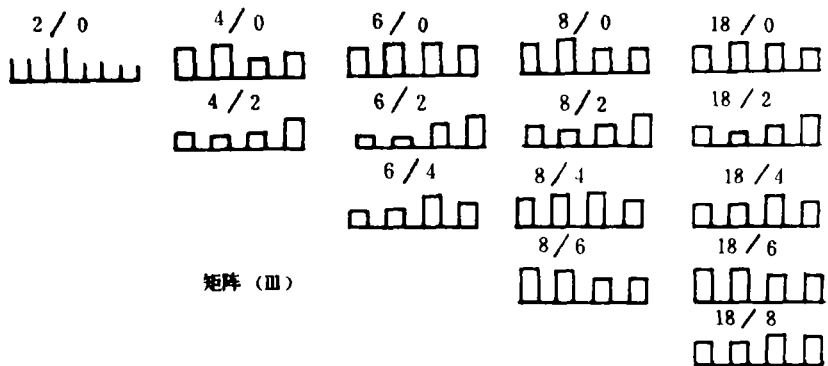
$$\begin{aligned} \text{矩阵 I: } F(2i-1, 2j, k) &= \left[\frac{a(2i-1)}{a(2j)} \right]_k \\ (i = 1, 2, \dots, 5; j = 0, 1, \dots, 4; k = 1, 2, \dots, 4) \quad i > j. & \quad (5) \\ \text{矩阵 II: } F(2i, 2j-1, k) &= \left[\frac{a(2i)}{a(2j-1)} \right]_k \end{aligned}$$



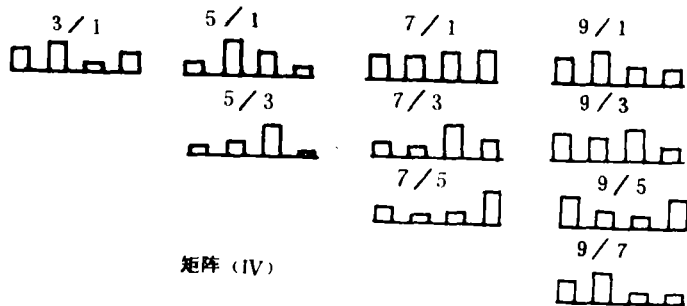
矩阵 (I)



矩阵 (II)



矩阵 (III)



矩阵 (IV)

图 2 矿物光谱归一化函数直方图矩阵

Fig. 2 Matrices of histogram of normalized functions of mineral spectrum

图中 $1/0$, $2/0$ 代表 $a(1)/a(0)$, $a(2)/a(0)$, 其中 $a(0)$, $a(1)$, $a(2)$ 为切比雪夫多项式系数。

$$(i = 1, 2, \dots, 5; j = 1, 2, \dots, 5; k = 1, 2, \dots, 4) \quad i > j \quad (6)$$

$$\text{矩阵 III: } F(2i, 2j, k) = \begin{bmatrix} a(2i) \\ a(2j) \end{bmatrix}_k$$

$$(i = 1, 2, \dots, 5; j = 0, 1, \dots, 4; k = 1, 2, \dots, 4) \quad i > j \quad (7)$$

$$\text{矩阵 IV: } F(2i + 1, 2j - 1, k) = \begin{bmatrix} a(2i + 1) \\ a(2j - 1) \end{bmatrix}_k$$

$$(i = 1, 2, \dots, 4; j = 1, 2, \dots, 4; k = 1, 2, \dots, 4) \quad i > j \quad (8)$$

图 2 中每个直方图上方斜线上下的数字分别对应函数 $F(i, j, k)$ 的 (i, j) 两自变量, 沿横轴方向从左向右与图 1 中的矿物光谱编号对应, 纵向不同直方高度为对应的两自变量 (i, j) 不变, 而 k 变化时 $F(i, j, k)$ 的归一化相对值。下面对 (5)、(6)、(7) 和 (8) 式归纳的 4 个函数矩阵进行讨论。

1. 矩阵 (I)

由图 2 中的矩阵 (I) 可知, 阵内各函数对不同矿物取值就不同, 而且阵内各直方图具有共同的变化规律, 4 种矿物的归一化函数值均具有如下关系:

$$\begin{aligned} F(2i - 1, 2j, 2) > F(2i - 1, 2j, 1) > F(2i - 1, 2j, 3) \\ > F(2i - 1, 2j, 4) \quad (i = 1, 2, \dots, 5; j = 0, 1, \dots, 4) \quad i > j \quad (9) \end{aligned}$$

即以函数取值由大到小为序, 矿物排列依次为: 叶腊石、伊利石、三水铝石、一水铝石。据此可将矿物剖面分为由三水铝石和一水铝石为成分的铝土矿体, 及由叶腊石和伊利石构成的蚀变晕圈两部分。对阵内各函数取值叶腊石明显大于其它矿物, 从而突出了以叶腊石成分为代表的蚀变晕圈的存在。所以根据阵 (I) 中各函数的取值及函数取值随 k 的变化规律, 可对热液蚀变矿物进行鉴别和分带, 还可提供有关侵入体位置、形态、深度和范围等有关的岩石和构造信息。

2. 矩阵 (II)

由图 2 中的矩阵 (II) 可知, 阵内各函数对不同矿物取不同值, 但阵内各函数也具有共同的变化规律, 而且这一变化规律与阵 (I) 的变化规律互补。4 种矿物的归一化函数值大体上有如下关系:

$$\begin{aligned} F(2i, 2j - 1, 4) > F(2i, 2j - 1, 3) > F(2i, 2j - 1, 1) \\ > F(2i, 2j - 1, 2) \quad (i = 1, 2, \dots, 5; j = 1, 2, \dots, 5) \quad i > j \quad (10) \end{aligned}$$

即以函数取值由大到小为序, 矿物排列依次为: 一水铝石、三水铝石、伊利石和叶腊石。因此同样可将剖面分为矿体及其围岩蚀变晕圈两部分。当阵内各函数在一水铝石处的函数值明显大于三水铝石及其它矿物的函数值时, 突出了铝土矿体内部的矿物学差异。这一特点具有双重意义: (1) 由于三水铝石和一水铝石含矿品位不同, 冶炼工艺不同, 区分两种矿物及其分布范围具有工业意义; (2) 当侵入体为酸性时, 一水铝石会失水形成刚玉, 如在日本 Goto 铝土矿—刚玉矿地区就是如此。所以由三水铝石向一水铝石过渡的地区即为刚玉矿的找矿方向。由此可见, 区分两种矿物还具有找矿勘探意义。

3. 矩阵 (III) 和矩阵 (IV):

从图 2 可知, 两阵内各函数对不同矿物取值不同, 而且都不具备共同的变化规律, 但两阵内的部分函数仍具有一定的应用意义。如阵 (III) 中的 $F(2i, 2, k) (i = 2, 3, 4, 5)$ 和

阵 IV 中的 $F(9, 1, k)$ 等仍具有矿物识别意义, 可对阵(I)和阵(II)进行补充和验证。

综上所述, 波形分析技术在矿物光谱研究中很具潜力。利用函数取值的变化可进行矿物识别和分带, 并提供有关蚀变、构造及找矿勘探的线索。应用表明, 各函数中以分别服从(5)、(6)两式的阵(I)和阵(II)内诸函数尤具特点, 两者均可将矿体及围岩分开, 并且分别突出了围岩及矿体内部的矿物学差异, 各有侧重、互相补充, 全面概括并如实反映了整条剖面的矿物学差异。

三、岩石光谱波形分析

在山西五台山后峪地区, 沿一条有金矿化异常、贯穿长英质和黄铁绢英质不同岩石类

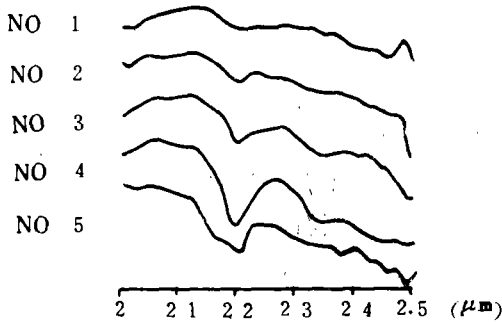


图3 蚀变岩石光谱

Fig. 3 Spectrum of alteration rocks.

图中编号为采样编号

型的断裂破碎带, 采得 5 块岩石样品, 其光谱如图 3 所示。从图中可以看出岩石光谱在 $2.2\mu\text{m}$ 附近均出现了不同强度的羟基吸收特征, 在 $2.35\mu\text{m}$ 处出现了微弱的碳酸根吸收特征, 而且羟基吸收和碳酸根吸收最强的点都出现在 No.4 个样品的光谱中。这与岩石样品的显微镜薄片岩矿鉴定结果相吻合, 鉴定表明由于发生了强烈的绢云母化蚀变和微弱的方解石化蚀变, 岩石中生成了相当数量的绢云母和微量的方解石矿物, 从而构成了羟基吸收和碳酸根吸收的物质基础。

(一) 羟基吸收特征波形分析

与矿物光谱处理方法一样, 对图 3 所示岩石光谱的羟基吸收特征进行拟合, 求得 55 个函数, 亦归纳出 4 个归一化函数直方图矩阵, 同样可用(5)、(6)、(7)和(8)4式作为其通式 ($k = 1, 2, \dots, 5$)。其中归一化矩阵(I)如图 4 所示。图 4 中各直方图直方值代表不同样品的羟基吸收特征函数归一化相对值, 其它如直方值排列方法及各直方图上方的符号的意义与图 2 相同。

从图 4 可知, 阵内各函数对不同岩石样品取值不同, 而且除去 $F(3, 0, k)$ 和 $F(3, 2, k)$ ($k = 1, 2, \dots, 5$) 两函数外, 阵内函数有共同的变化规律。5 种岩石样品的归一化函数值均具有如下关系:

$$F(2i - 1, 2j, 4) > F(2i - 1, 2j, 3) > F(2i - 1, 2j, 5) > F(2i - 1, 2j, 2) > F(2i - 1, 2j, 1) \quad (i = 1, 2, \dots, 5, j = 0, 1, 2, \dots, 4) \quad i > j \quad (11)$$

(11)式所反映的变化规律与图 3 所示岩石光谱羟基吸收特征强度变化相符, 因此函数 $F(2i - 1, 2j, k)$ ($i = 1, 2, \dots, 5; j = 0, 1, \dots, 4; k = 1, 2, \dots, 5; i > j$) 的取值与羟基吸收强度成正比。根据岩矿鉴定结果, 本文所用岩石样品中提供羟基振动的矿物绢云母占绝对主导地位, 所以羟基吸收与绢云母含量成正比。由此可见, 完全可以认为对于这

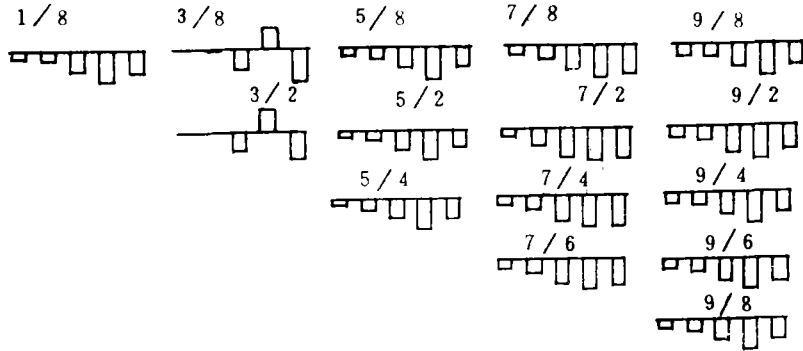


图 4 岩石光谱羟基吸收特征归一化函数直方矩阵(I)

Fig. 4 Matrix(1) of histogram of normalized functions of absorption feature of hydroxyl group of rock spectrum.

图中 1/0,2/0...代表 a(1)/a(0), a(2)/a(0)...; 其中 a(0), a(1), a(2)...为切比雪夫多项式系数条岩石学剖面,函数值与绢云母矿物相对含量成正比。

(二) 碳酸根吸收特征波形分析

对图 3 所示岩石光谱的碳酸根吸收特征进行拟合求得 55 个函数,亦归纳出 4 个归一化函数直方图矩阵,同样可用(5)、(6)、(7)和(8) 4 式作为其通式(k = 1,2,...,5)。其中归一化矩阵 (I) 如图 5 所示。图中各直方图直方值代表不同样品的碳酸根吸收特征函数归一化相对值,其它如直方值排列方法及各直方图上方符号的意义与图 2 意义相同。

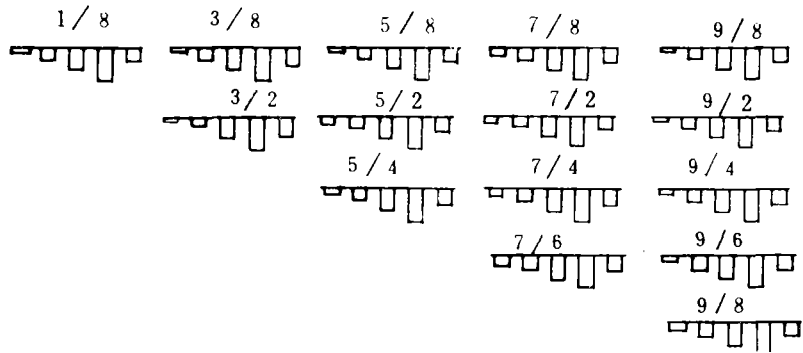


图 5 岩石光谱碳酸根吸收特征归一化函数直方矩阵 (I)

Fig. 5 Matrix(1) of histogram of normalized functions of absorption feature of carbonate radical of rock spectrum

图中 1/0, 2/0,...代表 a(1)/a(0), a(2)/a(0)...; 其中 a(0), a(1), a(2)...为切比雪夫多项式系数

从图 5 可知阵(I)中各函数 $F(2i-1, 2j, k)$ ($i = 1, 2, \dots, 5; j = 0, 1, \dots, 4; k = 1, 2, \dots, 5; i > j$) 可将微弱的碳酸根吸收特征成功地提取并突出出来。阵内各函数具有完全一致的变化规律, 5 种岩石样品的归一化函数值均具有如下关系:

$$F(2i-1, 2j, 4) > F(2i-1, 2j, 3) > F(2i-1, 2j, 5) > F(2i-1, 2j, 2) > F(2i-1, 2j, 1) \quad (i=1, 2, \dots, 5, j=0, 1, \dots, 4; i > j) \quad (12)$$

(12)式所反映的变化规律与图3所示岩石光谱碳酸根吸收特征强度变化相符,因此阵(I)内各函数可以确定吸收的存在及其相对强度的变化,并比较岩石样品中方解石矿物的相对含量。而这一点借助光谱曲线及岩矿鉴定是难于实现的。从图3可知岩石光谱碳酸根吸收特征极弱,而且彼此之间相差甚微难以比较;而显微镜薄片岩矿鉴定表明岩石样品中方解石含量平均低于3%,无法进行精确的统计和比较。而通过光谱波形分析却很容易地获得了解决。

三、对波形分析结果的讨论

(一)从图4和图5可以看出,沿断裂带不同,采样点的绢云母化蚀变和碳酸盐化蚀变强度不同,这可能与沿断裂带破碎程度和热液活动强度不同有关。

(二)由图3、图4和图5及式(11)和式(12)可以看出绢云母化蚀变和碳酸盐化蚀变互相迭加,绢云母化强的部位碳酸盐化也强,蚀变强弱变化规律一致。由于本地区为金矿化异常区,根据金矿化的一般规律,金矿化与绢云母化和碳酸盐化蚀变强度有关,两种蚀变互相迭加时更为有力,所以可以预计绢云母化和碳酸盐化强的部位金矿化也较强。

(三)计算表明,在由(5)、(6)、(7)、(8)4式概括的4个波形分析归一化函数矩阵内,各函数的值域差异很大,这必然导致函数灵敏度上的差异,域值大的相应的灵敏度较高。表1给出了图2所示矿物光谱各矩阵值域变化情况,其中 F_{max} 和 F_{min} 两列分别对应各矩阵内值域最大和最小的函数的 (i, j) 两变量和值域 ΔF ,最后一列 $\Delta F_{max}/\Delta F_{min}$ 为各矩阵 ΔF 的变化倍数。从表中可知所有函数中最灵敏的和最不灵敏的函数分别为 $F(8, 5, k)$ 和 $F(5, 0, k)$,前者的值域是后者的1669.92倍,可见变化之大。而且各矩阵内数值域变化也很大,变化最大的为72.95倍,最小的也有32.58倍。因此在具体应用时,应慎重选取所用函数方能达到最佳效果。

表1 蚀变矿物光谱函数矩阵值域

Table. 1 Value Range of matrices of functions of alteration minerals spectrum.

矩阵序号	F_{max}		F_{min}		$\frac{\Delta F_{max}}{\Delta F_{min}}$
	i, j	ΔF	i, j	ΔF	
I	9, 6	8.3839×10^{-1}	5, 0	2.0398×10^{-2}	41.12
II	8, 5	3.4063×10	2, 1	5.8980×10^{-1}	57.75
III	6, 2	7.1958×10^{-1}	6, 0	2.2085×10^{-2}	32.58
IV	7, 5	5.5386	7, 1	7.2954×10^{-2}	72.95

五、结 论

应用表明切比雪夫比值函数波形分析技术是遥感地物光谱矿物学和岩石学研究的有

力武器,可借此进行矿物识别和矿物分带,确定绢云母化蚀变和碳酸盐化蚀变的存在及其相对蚀变强度的变化和蚀变矿物相对含量,进而为蚀变岩的岩性识别和岩性分带提供信息。因此,这是一种很具发展潜力的光谱研究方法。

参 考 文 献

- [1] Chang C.H., Collins W., Band Study for Development Airborne Infrared Scanner, Geophy. Environment Res.,

THE WAVEFORM ANALYSIS OF CHEBYSHEV RATIO FUNCTIONS OF THE SPECTRUM OF ALTERED MINERALS AND ROCKS

Chen Ning

(Center for Remote Sensing in Geology, Ministry of Geology and Mineral Resources)

Xu Genxing

(Institute No. 207, Ministry of Aeronautics and Space)

Cui Chengyu

(Institute of Remote Sensing Application, Academia Sinica)

Abstract

This paper deals with the waveform analysis for the profile sample of minerals and rocks. within the region of 2.0—2.5 μm . The results show that technique of waveform analysis have applied value for spectrum research in identification of minerals, decision of sericitization, calcitization and the Relative quantity of altered minerals and rocks.

Key words Spectrum ratio function of Chebyshev Polynomial Coefficients Waveform analysis Altered minerals and rocks